

MÉTODOS Y MODELADO MATEMÁTICO PARA EL ANÁLISIS DE PROCESOS COMPLEJOS EN LAS ORGANIZACIONES

Héctor Raymundo Flores Cantú

UANL-FCFM

Universidad Autónoma de Nuevo León
Facultad de Ciencias Físico Matemáticas
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México

Resumen:

Existen diversas ramas de la matemática que pueden ser aplicadas en la solución de problemáticas reales. Sin embargo, suelen verse como una colección independiente de herramientas y es difícil visualizar una estructura unificada. En este trabajo se presentará una propuesta para esta estructura con el objetivo de facilitar la tarea de detección de oportunidades para el uso de métodos matemáticos en el análisis de procesos complejos, especialmente relacionado con empresas o industrias. Esta discusión permitirá ofrecer una metodología para explorar las posibilidades de uso de matemáticas en las problemáticas de las organizaciones. Este documento es producto del trabajo colaborativo del autor con consultores y modeladores de la empresa aleph5, quienes han trabajado directamente en decenas de proyectos que involucran modelos y métodos matemáticos en las más diversas industrias.

Palabras claves:

Matemática Aplicada, Modelado Matemático, Análisis de Procesos Complejos

Introducción

La matemática es la disciplina que procura la comunicación perfecta. Los objetos matemáticos están diseñados con este objetivo. Esta característica la convierte en una herramienta útil en el análisis y tratamiento de todo tipo de problemas complejos, tanto en el ámbito científico como en las organizaciones (empresas o industrias).

Durante la primera década del siglo XXI hemos visto un desarrollo importante de las aplicaciones de esta disciplina en las industrias y un incremento en el reconocimiento de las organizaciones y gobiernos en su importancia. Ver por ejemplo la referencia [1] para entender la importancia de la matemática en Europa desde el punto de vista de Alemania. Esto, a pesar de que desde los 80's y antes, comienza a generarse una vinculación entre empresas y academia en algunas instituciones aisladas como lo registra Friedman en la referencia [2].

El presente trabajo, es un resumen de algunas ideas relacionadas con la dificultad de aplicar la matemática en la generación de valor y el análisis de procesos reales complejos. Representa el resultado de un trabajo colaborativo entre el autor y expertos de la empresa aleph5 quienes tienen más de 25 años de experiencia en el uso de modelos matemáticos en proyectos aplicados. Esto con el objetivo de responder de una forma lo más estructurada y simple posible a la pregunta que muchas organizaciones se hacen respecto a la posibilidad de utilizar métodos o modelos matemáticos para el tratamiento de sus problemáticas.

Los proyectos aplicados donde se han usado estos métodos con éxito, no son fáciles de encontrar en la literatura; principalmente debido a la usual negativa de las empresas por publicar resultados de enfoques y análisis que pudiesen beneficiar a su competencia. Usualmente solo es posible referenciar trabajos realizados a organizaciones no lucrativas como es el caso de la referencia [3] donde parte del equipo de aleph5 colaboró en la automatización del suministro de agua en la ciudad de Jacksonville, Florida.

Lo que sí podemos adelantar es que existen diversas formas en que esta disciplina puede utilizarse para la generación de valor y en especial para el análisis de procesos complejos. Para iniciar la discusión, haremos justamente un análisis de lo que se entiende en las organizaciones como un proceso “complejo”.

Análisis de procesos complejos

Antes que nada, debo aclarar que al hablar de complejidad no nos referimos a la definición matemática, sino a la definición popular. Así, al hablar de un proceso complejo nos referimos a un proceso difícil de entender; pero profundizaremos en lo que esto significa a continuación.

La palabra analizar se usa indiscriminadamente en muchos contextos, sin embargo este vocablo tiene un significado muy preciso; se refiere en términos generales a la descomposición de un todo en partes para facilitar su estudio. La dificultad de analizar consiste en que no existe una forma única o correcta de realizar esta descomposición y dos expertos distintos pueden sugerir enfoques diferentes pero complementarios para esta tarea.

En el caso particular de aquellos procesos susceptibles a ser tratados con métodos matemáticos, la experiencia nos muestra que su complejidad puede analizarse estudiando las siguientes cuatro características de los mismos.

1. Existen muchos factores interconectados
2. Hay varios objetivos en conflicto
3. El entorno del proceso es dinámico
4. Siempre existe un grado de incertidumbre

La razón por la que la matemática sirve de apoyo en este tipo de procesos, es justo por su tratamiento de estos cuatro tipos de complejidades.

Factores interconectados: Cuando un proceso o situación presenta un funcionamiento que no es el esperado, es posible que cualquier observador pueda detectarlo; sin embargo, tomar medidas para corregirlo requiere de conocimiento profundo del proceso. Esto sucede por la existencia de muchos factores inherentes al proceso que se relacionan de formas difíciles de prever. Esta complejidad se manifiesta cuando al ajustar uno de los factores, se genera un efecto inesperado o no deseado en el resto de ellos.

Una de las mejores analogías es la de una telaraña, donde al intentar ajustar una parte de ella, se generan repercusiones en toda la red de formas difíciles de predecir. Esto significa que en un proceso complejo, resulta imposible aislar solo una parte del mismo para realizar ajustes.

Un enfoque correcto hacia esta complejidad consiste en el diseño de un modelo matemático del proceso que incluya todos los factores relevantes. Al modelar matemáticamente siempre debemos sacrificar algunos aspectos de la situación y es aquí donde la experiencia del modelador adquiere suma importancia.

Uno de los errores más comunes consiste en menospreciar la importancia de construir un modelo flexible que refleje las necesidades, aspectos importantes particulares del proceso y que facilite su uso. En muchos casos los modelos genéricos existentes en software prediseñado no generan el valor esperado o requieren de mucho trabajo y entendimiento profundo para su ajuste particular.

Lo más recomendable es dedicar un esfuerzo serio a construir un modelo matemático específico para el proceso que busca analizarse y apoyarse en expertos en el área de modelado. De esta forma, el diseño de un modelo adecuado es trabajo conjunto de expertos en el proceso real y en modelado matemático. Este esfuerzo rendirá frutos valiosos al momento de usar el modelo en la práctica.

Objetivos en conflicto: Sin importar la situación, nunca existe un objetivo único que nos permita evaluar el funcionamiento de un proceso. Si nos enfocamos en reducir costos, afectamos la calidad o el servicio, si queremos mejorar la calidad, aumentaremos los tiempos de proceso, etc. En prácticamente todos los procesos complejos reales, existen varios objetivos o indicadores en conflicto.

Esta situación requiere de un enfoque de toma de decisiones basado en un balance de objetivos. Un mito popular es que los métodos matemáticos pueden automatizar la toma de decisiones. Esto solo sucede en casos muy específicos (por ejemplo en el control automático). Sin embargo, aún en estos casos, el control debe ser diseñado por un experto que haya considerado previamente las decisiones que representan el comportamiento que se espera. En la mayoría de los casos, los modelos y algoritmos se utilizan para apoyar la toma de decisiones filtrando opciones malas y entregando al tomador de decisiones solamente un conjunto pequeño de buenas opciones entre las que se debe elegir una. En casi todos los casos, incluso se requiere de un proceso cíclico antes de llegar a una decisión final.

Las áreas de optimización y en particular optimización multi-objetivo (así como optimización multinivel) ofrecen alternativas adecuadas para el tratamiento de esta complejidad; es decir, para el balance de indicadores. Estas herramientas suelen ser incluidas

en un sistema de soporte a la toma de decisiones o DSS por sus siglas en inglés (Decision Support Systems).

Entorno dinámico: En todo tipo de problemáticas reales, la toma de decisiones está inmersa en un entorno siempre cambiante. Las decisiones no solo deben considerar los factores indicados, sino que es necesario considerar que todos ellos están en continuo cambio. Esta dinámica puede hacer que una buena decisión hoy, no sea tan buena en el futuro y nos obliga a procurar un tiempo relativamente rápido de respuesta en todo análisis realizado.

Muchos responsables de procesos reconocen este aspecto como el más difícil de tratar. En ocasiones es posible realizar análisis cualitativos utilizando herramientas computacionales simples como hojas de cálculo en algunas horas o días, pero los cambios siempre presentes en las condiciones reducen la validez de los mismos, siendo difíciles y tediosos de realizar.

Aunque los modelos matemáticos y los algoritmos aceleran los análisis, no sirven por sí mismos para tratar los cambios continuos. Un enfoque para enfrentar esta dificultad, consiste en diseñar diferentes modelos del mismo proceso para cada escala diferente de tiempo. Esto representa una separación de la toma de decisiones en distintos niveles. Mencionaremos al menos cuatro niveles en los que se enfoca la toma de decisiones mediante el uso de modelos matemáticos.

1. Nivel estratégico: En este nivel se toman decisiones sobre los objetivos del negocio o del proceso. Esto requiere un conocimiento real del entorno y del proceso mismo que puede adquirirse mediante análisis de datos. Los objetivos son a largo plazo y las decisiones recaen en las áreas directivas.
2. Nivel de planeación: Entendemos por planeación, a las decisiones relativas a la distribución de recursos a las distintas áreas para que estén disponibles en el momento y lugar adecuados, posibilitando así el logro de los objetivos estratégicos. Estas decisiones se toman de forma periódica (semanal o mensual) dependiendo del tipo de proceso.
3. Nivel de programación: La programación se refiere a la asignación de tareas, responsables y recursos específicos que lleven a cabo el plan del nivel anterior. En este nivel se incluye también el tiempo como un recurso. En resumen, la planeación determina de manera detallada la forma en que se ejecutarán las actividades

necesarias para la obtención de los resultados esperados. Un programa suele diseñarse con una frecuencia diaria o a lo más semanal. Suele ser una mala idea (o pérdida de tiempo) el realizar programaciones a más de un mes de resolución, esto debido a la enorme incertidumbre existente.

4. Nivel de ejecución: El nivel más dinámico de toma de decisiones trata con la detección del cumplimiento de los programas y el tratamiento de desviaciones. Las cosas no siempre ocurren de acuerdo a lo programado y es necesario tener la capacidad de reaccionar ante estos imprevistos, sea mediante acciones específicas o mediante la emisión de mensajes que permitirán a los responsables reasignar recursos o redefinir tareas. En este nivel, las decisiones son en tiempo real y en algunos procesos pueden incluso automatizarse.

Incertidumbre: En algunos procesos, existe mucha información incierta ya sea debido a la falta de ella o a los errores inherentes. El manejo de la incertidumbre en los procesos debe ser uno de los primeros aspectos que debe discutirse ya que existen formas muy variadas de tratar con ella. En algunos procesos se considera que los datos que recibimos son de calidad suficiente y podemos, de manera segura, ignorar la incertidumbre. En casos pueden diseñarse procesos adicionales para este manejo, como es el caso del proceso de inventarios que tiene el objetivo específico de absorber la incertidumbre en la demanda.

Siempre es posible realizar simulaciones o aplicar métodos estocásticos, sin embargo debemos ser cuidadosos porque estos enfoques tienden a crear una complejidad muy alta en los modelos y pueden volverlos imprácticos. En cualquier caso, conviene realizar un análisis de riesgos para entrar de manera más informada en la etapa de modelado ante la posibilidad de incertidumbre; esto, porque no todo lo que ignoramos tiene el mismo impacto en lo que nos interesa.

Métodos matemáticos más utilizados

Cada tipo de problemática requiere del uso particular de uno o varios métodos matemáticos. Es difícil establecer de manera definitiva los métodos adecuados para cada problema, esto siempre cambia de acuerdo a la situación. Sin embargo, podemos detectar ciertas tendencias en cuanto a los métodos que suelen generar un valor mayor de acuerdo al tipo de problemática a la que enfrentamos.

Técnicas de modelado matemático

Existe una diversidad de técnicas de modelado apropiadas para cada tipo de situación que se requiere analizar. Sistemas matriciales, ecuaciones diferenciales o algebraicas, autómatas celulares, simulaciones, sistemas de reglas, sistemas dinámicos, redes neuronales, etc. Cada tipo de modelo resulta adecuado dependiendo de los factores específicos involucrados en el proceso y podemos utilizar los cuatro niveles de toma de decisiones antes discutidos para sugerir los tipos de modelos que podrían ser de utilidad.

La **tabla 1** representa solo una tendencia y se refiere a que frecuentemente ese tipo de modelos resultan más apropiados para el nivel indicado. Es posible que algunas técnicas de modelado hayan sido aplicadas de forma más amplia en ciertos casos. Al lector interesado en temas de modelado matemático se le sugiere iniciar con literatura como las referencias [4,5].

Tabla 1. Técnicas de modelado de acuerdo al nivel de toma de decisiones

Nivel de toma de decisiones	Técnica de modelado matemático
Estratégico	Visuales/Estadísticos
Planeación	Sistemas matriciales
Programación	Simulaciones
Ejecución	Sistemas de reglas

Técnicas de visualización

En los últimos años, el desarrollo informático ha traído una riqueza en técnicas y métodos para la visualización de datos mediante el desarrollo de la computación gráfica y el manejo de información multimedia. Un buen diseño de visualización permite condensar la información importante facilitando así el proceso de toma de decisiones. Ver por ejemplo la referencia [6] así como otros libros del mismo autor.

Optimización matemática

Con optimización nos referimos a todos los tipos de ella (lineal, cuadrática, entera, convexa, no-lineal, combinatoria, estocástica, bi-nivel, multicriterio, etc.). En la literatura, el estudio de los algoritmos correspondientes recibe el nombre de **programación matemática** en lugar de optimización matemática, lo que puede causar algunas confusiones. Así por ejemplo,

la programación lineal se refiere a los algoritmos para resolver problemas de optimización basados en modelos lineales. Dos referencias muy recomendables para optimización son [7,8].

El tipo de algoritmos se basa completamente en el tipo de modelo matemático que se haya diseñado para el proceso. Por mencionar un ejemplo, los modelos de sistemas matriciales se abordan con programación lineal (en ocasiones binaria, entera o cuadrática), mientras los modelos de ecuaciones algebraicas o diferenciales pueden usar programación convexa y no-lineal.

Así, la optimización se usa frecuentemente en los niveles de planeación y programación, permitiendo el tratamiento de modelos con decenas o cientos de miles (en ciertos casos incluso millones) de variables de forma simultánea. Existen muchos algoritmos comerciales [Gurobi y Cplex entre otros] que tratan este tipo de modelos aunque su uso no es nada sencillo, requiriendo un entendimiento profundo del comportamiento del modelo matemático construido y al menos buenas nociones de las bases teóricas del algoritmo utilizado.

Heurísticos

Los heurísticos son en esencia algoritmos muy similares a los de optimización, pero son usados cuando la estructura de los modelos no es apropiada para esos últimos. A diferencia de la optimización, los heurísticos no garantizan una solución matemática al problema de optimización. Aún con esta deficiencia, los heurísticos pueden ofrecer soluciones útiles en diferentes situaciones cuando no existe algoritmo matemático conocido o si la estructura matemática del modelo obtenido no es simple. A diferencia de los algoritmos de programación lineal, entera o cuadrática, hay pocos heurísticos comerciales recomendables, debido a que realmente deben ser creados ad-hoc. Solo en ciertos casos (como en las redes neuronales) es posible encontrar software comercial con heurísticos implementados. Una buena introducción a algoritmos heurísticos (y su implementación) es la referencia [9].

Sistemas expertos

De forma muy simplista, podemos decir que los sistemas expertos buscan emular un sistema de decisiones automatizado basado en el conocimiento organizado de expertos humanos. Estos sistemas requieren siempre de una etapa considerable de diseño y entrenamiento, así como una colaboración muy cercana con los expertos en el proceso (sin mencionar su interés en colaborar activamente en el desarrollo). Se utilizan cuando se requiere automatizar decisiones en particular en el nivel

de ejecución dentro de un sistema de monitoreo y control.

Análisis y minería de datos

El diseño de modelos adecuados requiere de un conocimiento profundo de los procesos involucrados. En general, este conocimiento puede provenir de la experiencia de los expertos, pero en casi todos los casos los modelos se alimentan al parcialmente de relaciones descubiertas a partir de su comportamiento histórico. Esto por medio de análisis estadísticos o de patrones encontrados mediante métodos de minería de datos.

El propósito del análisis de datos es extraer de los datos históricos (existentes o producto de un diseño de experimentos); información útil para la creación de los modelos que apoyarán la toma de decisiones.

Aunque el análisis de datos se refiere por definición al análisis de lo que ya sucedió, el realizar estos análisis de forma correcta permite tener una mejor visión de lo que podemos esperar en el futuro. Una introducción a este tema es la referencia [10].

Problemas y métodos matemáticos

La **Figura 1** muestra un resumen de la forma en que los métodos matemáticos suelen ser aplicados en el tratamiento de problemáticas reales de acuerdo al nivel de toma de decisiones correspondiente.

Conclusiones y agradecimientos

El uso de métodos y modelos matemáticos en problemas de organizaciones en este inicio de siglo XXI resulta muy similar el uso de las computadoras en los años 80's. Con muchas expectativas, promesas pero nada simple de implementar correctamente y con muchas decepciones.

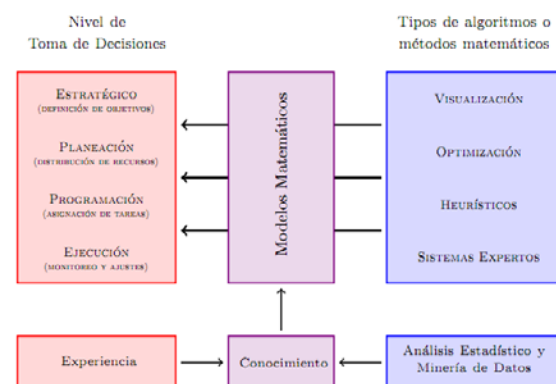


Fig. 1 Tipos de problemas y métodos matemáticos.

La matemática es una disciplina muy sofisticada y con una diversidad de métodos al grado que en la actualidad no existe una sola persona capaz de dominar todos sus aspectos. Como consecuencia de esto, su aplicación en el análisis de problemáticas complejas requiere mucha experiencia y en particular trabajo colaborativo entre directivos, expertos en el proceso, matemáticos modeladores, expertos en los algoritmos adecuados y en tecnologías de información. A cambio de tener en cuenta estas dificultades, una organización puede verse muy recompensada, debido a la capacidad de generación de valor que puede generar un modelo matemático adecuado para el proceso incluido en un sistema de toma de decisiones bien diseñado.

Agradezco en particular al equipo de modeladores, consultores y desarrolladores de la empresa aleph5 (ver referencia [11]) por compartir mucha de su experiencia en el enfoque de proyectos aplicados en diversas empresas, así como por aportar con ideas y sugerencias para los puntos aquí tratados.

Referencias

- [1] Greuel, G.M., Remmert, R. und Rupprecht, G. *Mathematik – Motor der Wirtschaft*. Springer. 2008.
- [2] Friedman, A. y Littman, W. *Industrial Mathematics: A Course in Solving Real-World Problems*. Society for Industrial and Applied Mathematics. 1987.
- [3] Barnett, M., Lee, T. and Jentgen, L. *Real-time Automation of Water Supply and Distribution for the City of Jacksonville*. Florida, USA. EICA 9-3. 2004.
- [4] Edward, D. *Guide to Mathematical Modelling*. Industrial Press. 2007.
- [5] Morrison, F. *The Art of Modeling Dynamic Systems: Forecasting for Chaos, Randomness and Determinism*. Dover Publications. 2008.
- [6] Tufte, E. R. *The Visual Display of Quantitative Information*. Graphics Pr. 2001.
- [7] Schrijver, A. *Theory of Linear and Integer Programming*. Wiley. 1998.
- [8] Schrijver, A. *Combinatorial Optimization*. Springer. 2003.
- [9] Skiena, S. S. *The Algorithm Design Manual*. Springer. 2010.
- [10] Berthold, M. R. Borgelt, C. Hoppner, F. and Klawonn, F. *Guide to Intelligent Data Analysis: How to Intelligently Make Sense of Real Dat*. Springer. 2011.
- [11] aleph 5. <http://www.aleph5.com> 2013.

Datos del Autor:

Héctor Raymundo Flores Cantú

El autor es matemático egresado de la Universidad de Guanajuato y el Centro de Investigación en Matemáticas, CIMAT. Realizó estudios de Maestría en Matemáticas Industriales y Doctorado en Optimización en la Universidad de Kaiserslautern, Alemania y el Instituto Fraunhofer para Matemáticas Industriales y Económicas. Es profesor de la UANL en el Posgrado en Ciencias con orientación en Matemáticas. Su área de especialidad es la colaboración en proyectos aplicados relacionados con modelado matemático, optimización, así como análisis y minería de datos.

Dirección del autor: Playa Olas Altas No. 3433 Col. Primavera, C.P. 64830, Monterrey, Nuevo León, México.

Email: hector.florescn@uanl.edu.mx